

# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.762

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96>

## Влияние химического состава абразива и прочности межслойных границ на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов

М.А. Исмаилов

Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

✉ [al\\_myalim@mail.ru](mailto:al_myalim@mail.ru)

EDN: ZNNPJE

### Аннотация

**Введение.** Детали машин и механизмов, эксплуатируемые в различных условиях, при контакте с абразивными частицами быстро изнашиваются и выходят из строя. Например, при перекачке тяжелых буровых растворов из-за интенсивного изнашивания детали гидравлического блока бурового насоса через 5–10 часов работы необходимо менять. Анализ научных публикаций и опыт эксплуатации буровых насосов указывают на то, что существующие способы повышения износостойкости конструкционных сталей при абразивном и ударно-абразивном воздействии малоэффективны. Поэтому актуальной задачей является повышение этих свойств в результате совершенствования конструкции и технологии изготовления деталей буровых насосов, что позволит снизить затраты на производство их комплектующих, ремонт и обслуживание. Целью данной работы является исследование влияния химического состава абразивных частиц и прочности межслойных границ «износостойкая сталь — резина» на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов.

**Материалы и методы.** Слоистые композиционные материалы (СКМ) состояли из износостойкого слоя стали 40Х и резинового слоя бутилкаучука марки БК-1675Н. Ударно-абразивную износостойкость СКМ рассматривали в соответствии с ГОСТ 23.207–79 на специальной установке. В качестве абразивного материала была взята смесь оксида кремния и алюминия. Изучение микроструктуры поверхности СКМ, химического и фазового состава абразивного порошка проводили на оборудовании ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ). Адгезионную прочность межслойных границ СКМ исследовали на разработанной для этой цели установке.

**Результаты исследования.** В результате исследований СКМ на ударно-абразивный износ выявлено, что их износостойкость в несколько раз выше, чем у сталей, используемых для изготовления деталей, устойчивых к воздействию абразивных частиц. Выявлено, что в процессе изнашивания твердые частицы оксидов алюминия и кремния активно внедряются в поверхность СКМ, увеличивая интенсивность износа, тогда как менее твердые частицы алюминатов магния и кальция при ударе разрушаются и закрепляются в образовавшихся дефектах на поверхности СКМ, незначительно снижая интенсивность износа. Установлено, что при соединении слоев СКМ методом горячей вулканизации под давлением и концентрации меди 25–30 % в спеченной стали П40Х адгезионная прочность повышается до 0,93 МПа.

**Обсуждение и заключение.** Разработанные СКМ позволяют не только повысить абразивную и ударно-абразивную износостойкость, но и в качестве износостойкого слоя использовать более дешевые марки стали. Предложенный способ соединения слоев СКМ из спеченных сталей исключает необходимость в дополнительной механической обработке поверхности и в использовании специальных клеящих составов. Такие СКМ могут использоваться в узлах деталей машин и механизмов, которые эксплуатируют в условиях абразивного и ударно-абразивного износа.

**Ключевые слова:** ударно-абразивная износостойкость, слоистый композиционный материал, буровые насосы, упруго-диссипативная подложка, адгезионная прочность

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

**Для цитирования.** Исмаилов М.А. Влияние химического состава абразива и прочности межслойных границ на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(3):88–96. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96>

*Original Empirical Research*

## Influence of Chemical Composition of Abrasive Materials and Strength of Interlayer Boundaries on Impact and Abrasive Wear Resistance of Layered Composite Materials

Markiz A. Ismailov 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

✉ [al\\_myalim@mail.ru](mailto:al_myalim@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Parts of machines and mechanisms that operate in various conditions and come into contact with abrasive particles can quickly wear out and fail. This is especially true for the hydraulic block of a drilling pump, which, due to intense wear, must be replaced after only 5–10 hours of use when pumping heavy drilling fluids. The analysis of scientific literature and experience with drilling pump operation shows that current methods for increasing the wear resistance of structural steels against abrasive and impact-abrasive forces are ineffective. Thus, it is an urgent task to enhance these properties through improved design and manufacturing techniques for drilling pump components, which would reduce the cost of production, repairs, and maintenance. The aim of this work is to study the effect of chemical composition of abrasive particles and the strength of the interlayer boundaries of “wear-resistant steel — rubber” on the impact and abrasive wear resistance of layered composite materials.

**Materials and Methods.** Layered composite materials (LCMs) consisted of: a wear-resistant layer of 40X steel and a rubber layer of BK-1675N butyl rubber. The impact and abrasive wear resistance of the LCMs was studied in accordance with GOST 23.207-79 on a special installation. A mixture of silicon oxide and aluminum was used as an abrasive material. The microstructure of the SCMs surface, as well as the chemical and phase composition of the abrasive particles, were analyzed using equipment from the Common Use Center “Nanotechnology” of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). The adhesive strength between the layers of the LCMs was determined using a custom-built installation.

**Results.** The results of the study revealed that the wear resistance of the LCMs was several times higher than that of steels used for manufacturing parts resistant to abrasive particles. During the wear process, solid particles of aluminum and silicon oxides actively embed in the surface of the LCMs, increasing the intensity of wear. In contrast, less solid particles of magnesium and calcium aluminates were destroyed and fixed in formed defects on the LCM surface, slightly reducing wear intensity. It was also found that, when SCM layers were joined by hot vulcanization under pressure with a copper concentration of 25–30% in sintered P40X steel, adhesive strength increased to 0.93 MPa.

**Discussion and Conclusion.** The developed SCMs make it possible not only to increase the abrasive and impact-abrasive wear resistance, but also to use cheaper grades of steels as a wear-resistant layer. The proposed method of joining the SCM layers from sintered steels eliminates the need for additional surface machining and the use of special adhesives. Such SCMs can be used in the assemblies of machine parts and mechanisms that are operated in conditions of abrasive and shock-abrasive wear.

**Keywords:** impact and abrasive wear resistance, layered composite material, drilling pumps, elastic-dissipative substrate, adhesive strength

**Acknowledgements.** The author would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

**For citation.** Ismailov MA. Influence of Chemical Composition of Abrasive Materials and Strength of Interlayer Boundaries on Impact and Abrasive Wear Resistance of Layered Composite Materials. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(3):88–96. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96>

**Введение.** Основной причиной снижения эксплуатационной надежности деталей и механизмов в горнодобывающей [1], нефтегазовой [2], строительной, дорожной и перерабатывающей промышленности [3] является воздействие таких видов изнашивания, как абразивный, ударно-абразивный, коррозионный, усталостный и другие [4]. Например, большинство научных исследований и опыт эксплуатации буровых насосов указывают на то, что детали гидравлического блока в большей степени подвержены воздействию абразивного и ударно-абразивного изнашивания.

Анализ научных публикаций показал, что материалы, разрабатываемые для работы в условиях ударно-абразивного изнашивания, должны обладать высокой твердостью, вязкостью и износостойкостью [5]. Однако опыт эксплуатации буровых насосов [6] указывает на то, что одной из причин снижения эксплуатационной надежности деталей клапана является низкая ударно-абразивная износостойкость конструкционных сталей [7] и уплотнительных упругих элементов [8]. Поэтому актуальной задачей является разработка технологии получения слоистых композиционных материалов, в которых один из слоев выполнен из износостойкого материала, а другой — из упруго-диссипативного, например, на основе резиновых смесей, позволяющий поглощать часть воздействующей на деталь энергии удара.

**Материалы и методы.** Для испытаний изготовили слоистые образцы, один слой которых выполнен из износостойкой стали (рис. 1, поз. 1), а другой, упругий слой — из бутилкаучука марки БК-1675Н (рис. 1, поз. 2). В качестве износостойкой стали использовали:

- катанную сталь 40Х, которую подвергли термической обработке — закалке при 860 °С с охлаждением в масле и отпуску при 200 и 570 °С с охлаждением на воздухе;
- спеченную и горячедеформированную сталь П40Х.

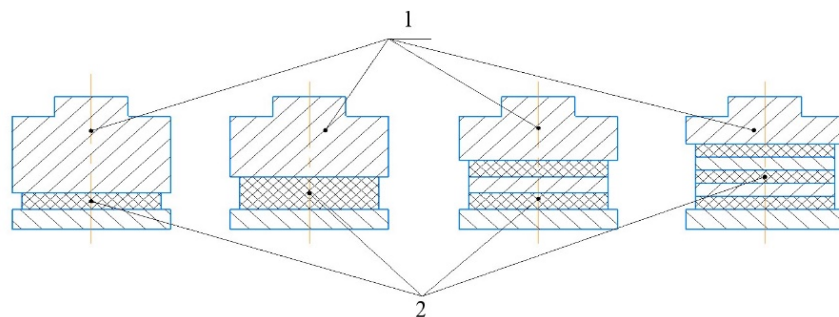


Рис. 1. Образцы СКМ для испытания на ударно-абразивную износостойкость:  
1 — износостойкий материал; 2 — упруго-диссипативная подложка

Испытание на ударно-абразивную износостойкость слоистых образцов проводили в соответствии с ГОСТ 23.207–79<sup>1</sup> на специальной установке [9]. Принцип действия установки основан на принудительном ударе образца по контртелу через слой просыпающегося абразива. Износ образцов оценивался по потерянной массе после 1000 ударов на аналитических весах ОНАУС Pioneer PA [10].

В ГОСТ 23.207–79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание» для сравнения абразивной и ударно-абразивной износостойкости различных материалов в качестве абразива рекомендуется использовать карбид кремния. Однако применительно к конкретным условиям эксплуатации машин и механизмов ГОСТом допускается использование соответствующего абразивного материала. Например, для увеличения плотности буровых растворов используют различные утяжелители, выбор которых будет зависеть от конкретных условий бурения. В случае, когда требуются утяжелители с большей абразивностью, используют различные абразивные материалы [11]. Поэтому в качестве абразива при испытании на ударно-абразивную износостойкость использовали смесь оксидов кремния и алюминия.

Микроструктуру поверхности СКМ после испытания на ударно-абразивную износостойкость, рентгенографические исследования и качественный фазовый анализ абразивного порошка проводили в ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ).

Для исследования адгезионной прочности образцы из катанной стали 40Х, спеченной и горячедеформированной стали П40Х склеивали с резиной двумя способами: клеем на основе хлоропренового каучука и методом горячей вулканизации под давлением при температуре 160 °С в течение 20 мин. без использования клея [12]. Адгезионную прочность межслойных границ СКМ исследовали на разработанной для этой цели установке [13].

<sup>1</sup> ГОСТ 23.207–79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010682> (дата обращения: 22.05.2024).

**Результаты исследования.** Испытания с энергией удара от 3 до 23 Дж показали, что образцы из стали 40X после улучшения изнашиваются значительно больше, чем образцы после низкого отпуска (рис. 2, кривые 1 и 3). При этом использование упруго-диссипативной подложки (УДП) позволило снизить износ в 1,5–2 раза (рис. 2, кривые 2 и 4), по сравнению с образцами, которые испытывали без подложки (рис. 2, кривые 1 и 3).

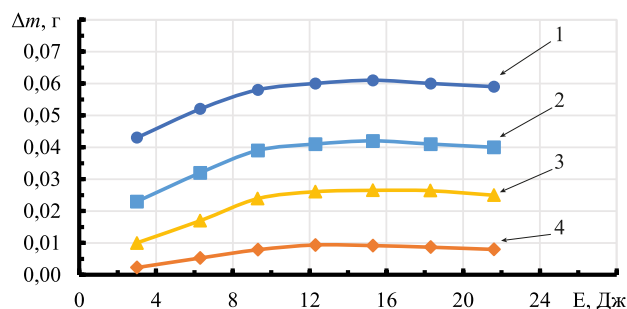


Рис. 2. Зависимость износа ( $\Delta m$ ) от энергии удара ( $E$ ) без (1, 3) и с резиновой подложкой (2, 4) СКМ с рабочим слоем из стали 40X после улучшения (1, 2) и низкого отпуска (3, 4)

На рис. 2 видно, что при увеличении энергии удара интенсивность износа образцов изменяется, и можно выделить два участка. На первом при увеличении энергии удара до 12 Дж износ образцов возрастает в результате внедрения абразивных частиц в их поверхность (рис. 3 а) и в межзеренные границы (рис. 3 б), что способствует интенсивному скалыванию микрообъемов металла. На втором участке при дальнейшем увеличении энергии удара в результате пластической деформации верхний слой образца упрочняется, а абразивные частицы, разрушаясь, шаржируют его поверхность, вследствие чего происходит незначительное замедление интенсивности износа.

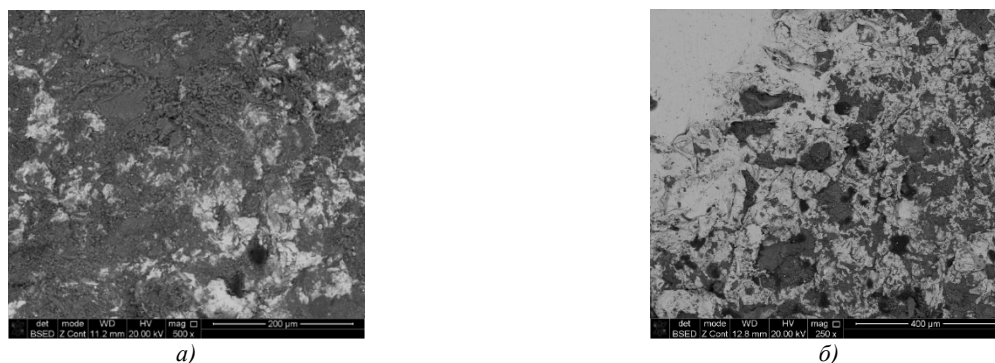


Рис. 3. Микроструктура поверхности рабочего слоя из улучшенной стали 40X: а — в установившемся режиме изнашивания; б — на стадии интенсивного изнашивания

Рентгенофазовый анализ показал, что используемый абразивный порошок преимущественно состоит из оксидов алюминия и кремния, алюминатов магния и кальция (рис. 4). Фазовый состав абразива после испытаний на износостойкость не изменился.

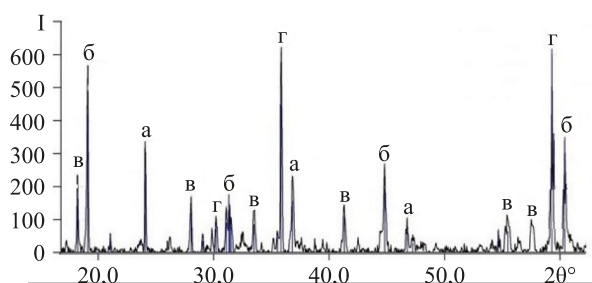
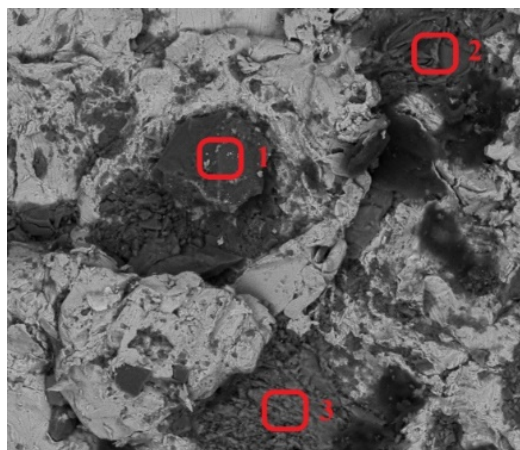


Рис. 4. Фазовый состав абразивного порошка, использованного при испытаниях на ударно-абразивный износ: а —  $\text{SiO}_2$ ; б —  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ; в —  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ; г —  $\text{Al}_2\text{O}_3$

После испытания ударную износостойкость на поверхности колец из стали 40X имеются участки с частицами оксидов кремния и алюминия, которые, внедряясь в поверхность образца, образуют лунки и активируют процесс разрушения на начальной стадии (рис. 5 а). Частицы алюмината магния (рис. 5 а, поз. 2) из-за меньшей твердости (по шкале Мооса 7,5–8), по сравнению с частицами оксида алюминия (твердость по шкале Мооса 9), при увеличении энергии удара частично внедряются в поверхность образца, а большая их часть разрушается.

Частицы алюмината кальция (рис. 5 а, поз. 3) из-за низкой твердости при всех значениях энергии удара активно шаржируют поверхность СКМ (рис. 3 а). Химический состав поверхности испытания в зоне расположения частиц абразива показан на рис. 5 б–жс.



а)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
C K	3,4	2,30	5,8	31,7
O K	45,8	0,35	59,5	10,3
Mg K	0,7	0,15	0,6	17,0
Al K	2,7	0,13	2,1	8,9
Si K	38,1	0,11	28,2	5,1
K K	1,0	0,25	0,5	19,3
Ca K	0,9	0,24	0,5	21,2
Ti K	1,0	0,34	0,4	18,2
Mn K	0,8	0,38	0,3	29,0
Fe K	5,6	0,41	2,1	7,1

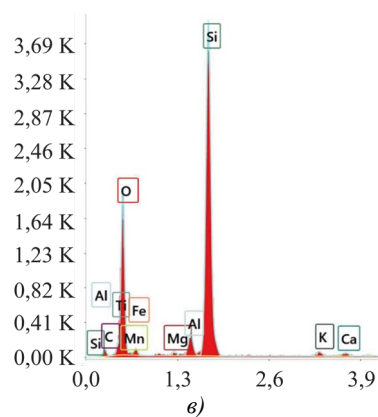
б)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
O K	42,8	0,08	57,0	9,2
Mg K	15,4	0,06	13,5	7,0
Al K	31,9	0,07	25,2	6,7
Cl K	0,4	0,08	0,2	19,7
K K	0,3	0,10	0,1	21,8
Ca K	2,1	0,11	1,1	5,5
Cr K	4,6	0,16	1,9	4,2
Mn K	0,3	0,20	0,1	35,0
Fe K	2,2	0,19	0,8	6,5

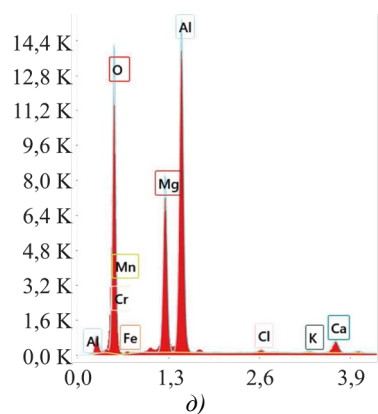
в)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
C K	6,1	0,34	10,5	12,7
O K	45,5	0,12	58,8	10,5
Na K	1,4	0,09	1,3	11,4
Mg K	1,5	0,05	1,2	9,1
Al K	18,6	0,05	14,2	6,3
Si K	0,6	0,05	0,4	10,6
S K	0,3	0,05	0,2	15,7
Cl K	0,4	0,05	0,3	11,4
Ca K	24,7	0,07	12,7	2,4
Fe K	0,9	0,12	0,3	8,7

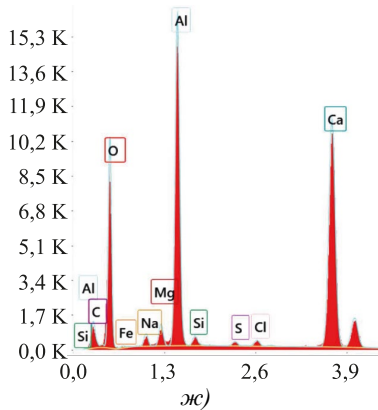
г)



е)



ж)



зс)

Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение компонентов в абразивных частицах на поверхности улучшенной стали 40Х на стадии интенсивного износа: б, в — оксида кремния; г, д — алюмината магния; е, жс — алюмината кальция



Исследования показали, что на эксплуатационную надежность СКМ существенно влияет адгезионная прочность межслойных границ. Адгезионная прочность межслойных границ СКМ «сталь — резина», скрепленных клеем на основе хлоропренового каучука (рис. 6, 1) и горячей вулканизацией (рис. 6, 2), существенно отличается.

На рис. 6 видно, что у СКМ, скрепленных клеем, адгезионная прочность с резиной больше, чем у СКМ, соединенных горячей вулканизацией под давлением. Адгезионная прочность образцов из стали П40Х с резиной практически одинакова при использовании обоих способов склеивания и составила 0,21 и 0,2 МПа соответственно (рис. 6 в и рис. 6 г).

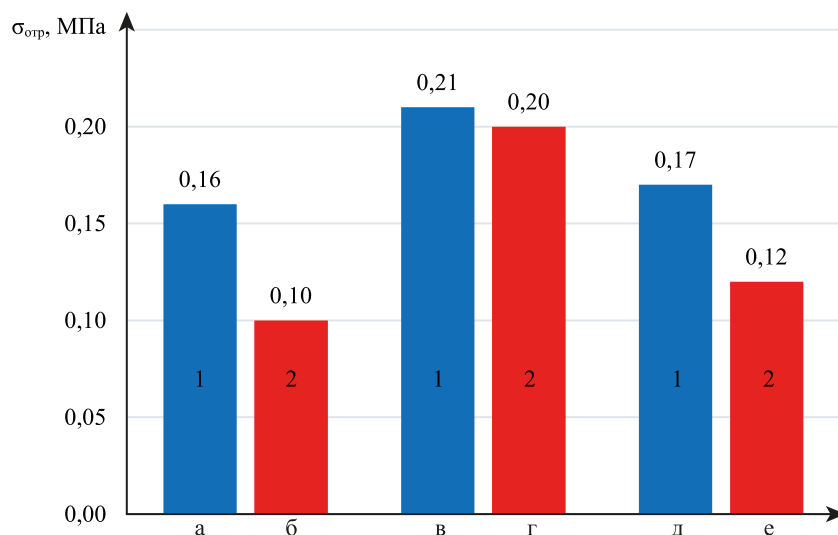


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности СКМ от технологии получения образцов стали: а, б — катанная 40Х; в, г — спеченная П40Х; д, е — горячедеформированная П40Х

При испытании на ударно-абразивную износостойкость СКМ, скрепленные клеем, разрушались вследствие перенапряжений вдоль границы «металл — резина», обусловленных их существенно различными жесткостью, степенью деформации и возникающим при этом по мере развития сдвиговых деформаций сложноплаженным состоянием [14].

Поэтому дальнейшие исследования были направлены на увеличение адгезионной прочности спеченной стали П40Х с резиной, соединенных методом горячей вулканизации. Одним из способов увеличения адгезионной прочности является добавление в состав шихты меди (рис. 7), которая при спекании выше температуры ее плавления под воздействием сил поверхностного натяжения растекается по свободной поверхности частиц и межчастичным границам. Это способствует увеличению поверхностной пористости прессовок.

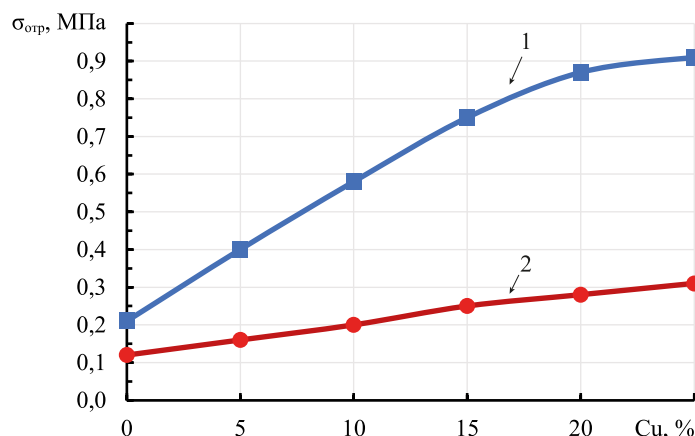


Рис. 7. Влияние меди на адгезионную прочность СКМ из спеченной (1) и горячедеформированной стали П40Х (2)

На рис. 7 показано, что увеличение концентрации меди в спеченной стали П40Х приводит к увеличению адгезионной прочности СКМ с 0,1 до 0,93 МПа, тогда как прочность межслойных границ СКМ с горячедеформированной сталью повышается незначительно (с 0,05 до 0,3 МПа) из-за того, что при динамическом горячем прессовании происходит сглаживание поверхности и большинство пор закрывается.

При горячей вулканизации под давлением происходит вдавливание сырой резины в поры на поверхности спеченной стали П40Х (рис. 8 а) и в процессе происходит сульфидирование меди и железа, а между частицами меди и резиной образуются промежуточные пленки сульфида меди нестехиометрического состава типа  $\text{Cu}_x\text{S}$  [15], которые повышают адгезию резины с матрицей спеченной стали.

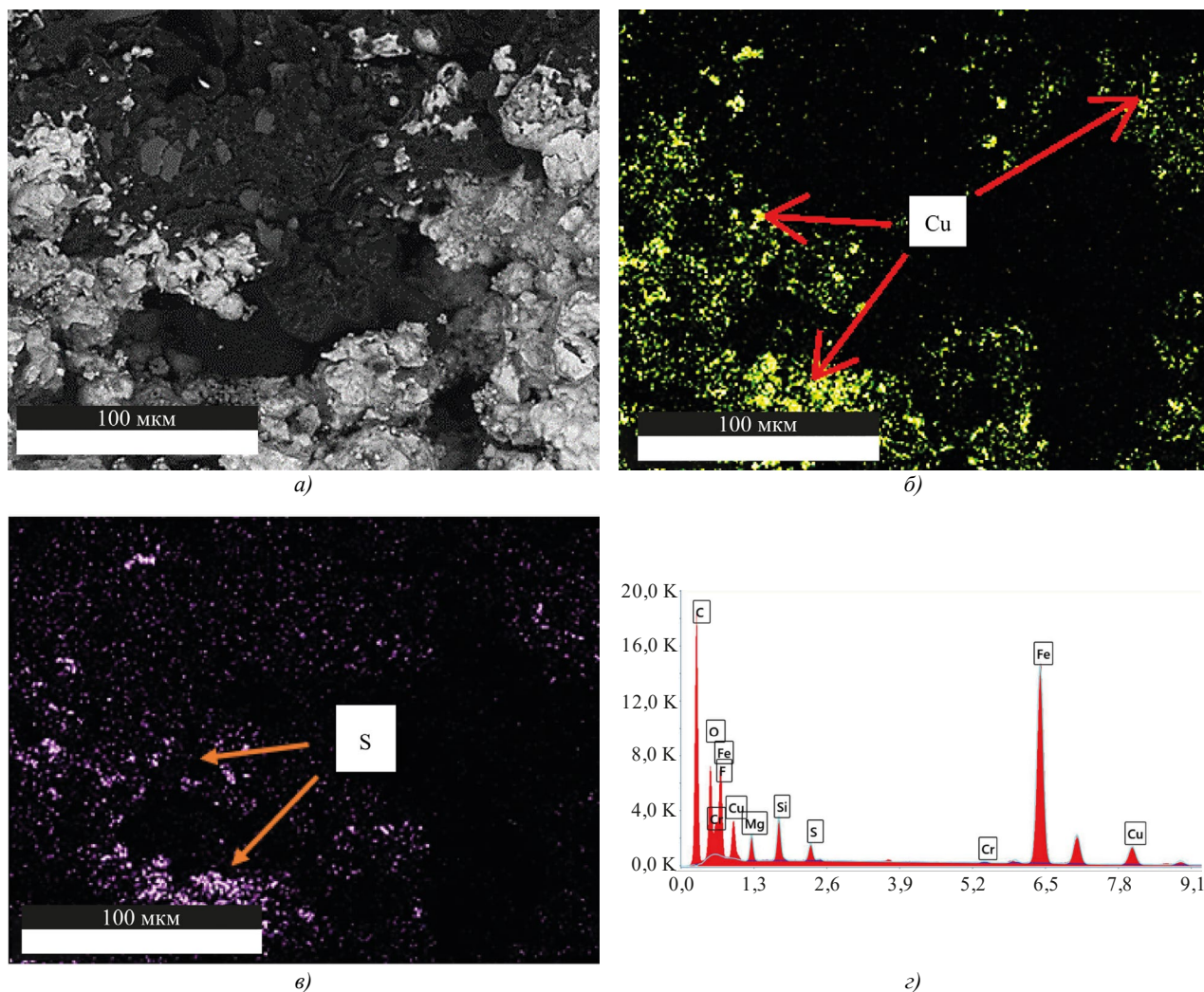


Рис. 8. Микроструктура переходной зоны СКМ:

а — спеченная сталь — резина; б — распределение меди; в — серы; г — других элементов

Анализ результатов картирования межслойной границы СКМ «спеченная сталь — резина» выявил зоны распределения элементов меди (рис. 8 б) и серы (рис. 8 в). Так, в зонах, обогащенных медью, вследствие образования сульфидов меди возрастает концентрация серы, что приводит к увеличению адгезии СКМ.

**Обсуждение и заключение.** Как показали исследования, интенсивность ударно-абразивного изнашивания зависит от структуры стали 40Х, энергии удара и химического состава абразивных частиц. Установлено, что с увеличением энергии удара с 3 до 9 Дж интенсивность абразивного износа образцов из стали 40Х повышается и мало зависит от вида термической обработки. Это связано с тем, что при этих значениях энергии удара твердые частицы абразива активно внедряются в поверхность образца, запуская механизм ударно-абразивного изнашивания. Увеличение энергии удара с 9 до 22 Дж приводит к снижению интенсивности изнашивания из-за того, что твердые абразивные частицы оксида кремния и алюминия, алюмината магния, не успевая внедриться в поверхность образца, разрушаются на более мелкие части и образуют более мелкие лунки, а частицы алюмината кальция активно разрушаются, закрепляясь в образованных лунках, микропорах и других дефектах.

Выявлено, что при добавлении в шихту от 5 до 20 % меди адгезионная прочность межслойных границ СКМ «сталь — резина» повышается в 3–4 раза в результате растекания меди под воздействием сил поверхностного натяжения по свободной поверхности частиц и межчастичным границам, а также образования сульфидов меди  $\text{Cu}_x\text{S}$  при горячей вулканизации под давлением.

## Список литературы / References

1. Гусев А.И., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. Повышение надежности и долговечности деталей горношахтного оборудования, работающего в условиях интенсивного ударно-абразивного износа, путем наплавки. *Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2021;(7):199–204.
2. Gusev AI, Kozurev NA, Usoltsev AA, Kryukov RE, Mikhno AR. Improving the Reliability and Durability of Mining Equipment Parts Operating under Conditions of Intense Impact and Abrasive Wear by Surfacing. *Nauchnye tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2021;(7):199–204. (In Russ.)
3. Абдюкова Р.Я., Багаутдинов Н.Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2012;(4):65–70. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2012-4-65-70>
4. Abdyukova RYa, Bagautdinov NYa. The Analysis of Drilling Pump Clack Valves Failures. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2012;(4):65–70. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2012-4-65-70> (In Russ.)
5. Гадалов В.Н., Кутепов С.Н., Петренко В.Р., Калинин А.А. Оценка повреждаемости деталей насосов бурового оборудования в режиме их эксплуатации. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2022;(10):492–499. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-492-499>
6. Gadalov VN, Kutepov SN, Petrenko VR, Kalinin AA. Assessment of Damage to Pump Parts of Drilling Equipment in Their Operation Mode. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(10):492–499. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-492-499> (In Russ.)
7. Бабаев С.Г., Габитов И.А., Меликов Р.Х. *Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования*. Баку: Азербайджанская государственная нефтяная академия; 2015. 400 с. URL: [https://www.anl.az/el\\_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf](https://www.anl.az/el_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf) (дата обращения: 22.05.2024).
8. Babaev SG, Gabibov IA, Melikov RK. *Fundamentals of the Theory of Reliability of Oilfield Equipment*. Baku: Azerbaijan State Oil Academy; 2015. 400 p. URL: [https://www.anl.az/el\\_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf](https://www.anl.az/el_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf) (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)
9. Братковский Е.В., Шаповалов А.Н., Дема Р.Р. Повышение ударно-абразивной стойкости. *Вестник машиностроения*. 2019;(3): 64–67.
10. Bratkovskiy EV, Shapovalov AN, Dema RR. Increasing the Shock-Abrasive Resistance of Steels. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019;(3): 64–67. (In Russ.)
11. Гадалов В.Н., Губанов О.М., Филонович А.В. Оценка повреждаемости деталей насосов бурового оборудования в режиме их эксплуатации. *Справочник. Инженерный журнал*. 2023;6(315):22–27. <https://doi.org/10.14489/hb.2023.06.pp.022-027>
12. Gadalov VN, Gubanov OM, Filonovich AV. Assessment of Damage to Pump Parts Drilling Equipment in Their Operation Mode. *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*. 2023;6(315):22–27. <https://doi.org/10.14489/hb.2023.06.pp.022-027> (In Russ.)
13. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Порошковые материалы для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания. *Металлург*. 2011;(3):61–64.
14. Gasanov BG, Sirotin PV. Powder Materials for Components Operating Under Impact-Abrasive Wear Conditions. *Metallurg*. 2011;(3):61–64. (In Russ.)
15. Kwiatkowski K, Nachman M. The Abrasive Wear Resistance of the Segmented Linear Polyurethane Elastomers Based on a Variety of Polyols as Soft Segments. *Polymers*. 2017;9(12):705. <http://doi.org/10.3390/polym9120705>
16. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Ефимов А.Д. Установка для испытания на ударно-абразивное и ударно-гидроабразивное изнашивание конструкционных и специальных материалов. Патент РФ, № 2434219. 2011. URL: <https://allpatents.ru/patent/2434219.html> (дата обращения: 22.05.2024).
17. Gasanov BG, Sirotin PV, Efimov AD. *Installation for Testing the Impact-Abrasive and Impact-Waterjet Wear of Structural and Special Materials*. Patent RF, No. 2434219. 2011. URL: <https://allpatents.ru/patent/2434219.html> (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)
18. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Установка для исследования ударно-абразивного и ударно-гидроабразивного износа. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010;76(11):60–63.
19. Gasanov BG, Sirotin PV. A Unit for Studying the Impact-Abrasive and Impact-Hydroabrasive Wear. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2010;76(11):60–63. (In Russ.)
20. Кухарев А.С., Гилаев Г.Г. Состав и параметры буровых растворов, необходимые для разработки месторождений нефти и газа. Охрана окружающей среды при работе с буровым раствором. В: *Труды II Международной научно-практической конференции*. Краснодар: Издательский Дом — Юг; 2022. С. 56–62.
21. Kuharev AS, Gilaev GG. The Composition and Parameters of Drilling Fluids Required for the Development of Oil And Gas Fields. Environmental Protection when Working with Drilling Mud. In: *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Krasnodar: Publishing House — Yug; 2022. P. 56–62. (In Russ.)



12. Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А. Установка для определения упругих и демпфирующих характеристик порошковых материалов с упруго-диссипативной подложкой. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021;87(6):63–69. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-6-63-69>

Sirotnin PV, Gasanov BG, Ismailov MA. Installation for Determination of the Elastic and Damping Characteristics of Powder Materials with an Elastic-Dissipative Substrate. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(6): 63–69. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-6-63-69> (In Russ.)

13. Сиротин П.В., Исмаилов М.А. Стенд для статических испытаний композиционных многослойных материалов (Варианты). Патент РФ, № 2725530. 2020. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1\\_20200702.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1_20200702.pdf) (дата обращения: 22.05.2024).

Sirotnin PV, Ismailov MA. Bench for Static Tests of Composite Multilayer Materials (Versions). Patent RF, № 2725530. 2020. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1\\_20200702.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1_20200702.pdf) (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)

14. Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение адгезионной прочности в межслойных границах порошковых железомедных сплавов с резиной. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение*. 2022;24(4):26–34. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.4.03>

Gasanov BG, Ismailov MA, Kharchenko EV. Increasing the Adhesive Strength in the Interlayer Boundaries of Powdered Iron-Copper Alloys with Rubber. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022;24(4):26–34. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.4.03> (In Russ.)

15. Никифорова Н.А., Шерышев М.А. Способы увеличения адгезионной прочности на границе резина — металлокорд. *Успехи в химии и химической технологии*. 2011;25(3(119)):24–28.

Nikiforova NA, Sheryshev MA. Ways to Increase the Adhesive Strength at the Rubber — Metal Cord Boundary. *Uspeski v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2011;25(3(119)):24–28. (In Russ.)

#### **Об авторе:**

**Маркиз Азизович Исмаилов**, старший преподаватель кафедры автомобиля и транспортно-технологические комплексы Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [SPIN-код: 9370-9816](#), [ORCID, al\\_myalim@mail.ru](#)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

#### **About the Author:**

**Markiz A. Ismailov**, Senior Lecturer of the Department of Automobiles and Transport and Technological Complexes, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, RF), [SPIN-code: 9370-9816](#), [ORCID, al\\_myalim@mail.ru](#)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 24.06.2024

**Поступила после рецензирования / Revised** 18.07.2024

**Принята к публикации / Accepted** 28.07.2024